第46卷　第1期
2023年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 1
Jan. 2023

水热条件共同驱动新疆湿地植物丰富度空间分布格局

韩大勇[1]，　牛忠泽[2]，　伍永明[3]，　高　健[2]

（1. 伊犁师范大学生物与地理科学学院，新疆 伊宁　835000；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所沙漠工程勘察设计所，新疆 乌鲁木齐　830011；3. 新疆维吾尔自治区林业和草原局，新疆 乌鲁木齐　830099）

摘　要：在地理空间尺度上，气候因素（如热量、降水量等）一直被认为是物种多样性的主要驱动因素。然而，气候因素能否解释湿地植物多样性格局仍不清楚。研究探讨了环境因素尤其水分和热量条件对湿地物种分布的影响，具体包括经度、纬度、海拔、年平均降水量、年平均气温、年平均蒸发量和年平均日照时数总计7个指标，研究对象涉及新疆3个二级流域的26处湿地公园，应用结构方程模型分析了各指标对湿地植物丰富度影响的相对大小及其相互作用关系。另外，还利用莫兰指数（Moran's *I*）对各变量残差进行了空间相关性分析，以评估空间相关性的影响。结果表明：（1）结构方程模型总计解释了41.8%的物种丰富度变异，以年平均降水量对物种丰富度总效应最高，为0.47，其次是年平均日照时数，为−0.42，其中年平均降水量为正效应，年平均日照时数为负效应。其他各指标对物种丰富度的效应均不显著。（2）年平均降水量对植物丰富度的影响主要表现为直接效应，占总效应的92.86%，年平均日照时数对植物丰富度的影响主要是间接效应，占总效应的54.76%。（3）空间相关性分析表明年平均降水量和年平均日照时数的残差均不存在空间相关性，莫兰指数在−0.15~0.10范围内波动，可以认为是可靠的预测指标。综上，新疆湿地植物丰富度主要受水热条件的共同驱动，且热量的作用依赖于水分条件，在未来湿地植物多样性保护工作中，应加强气候变化对植物多样性影响的评估和应对措施。

关 键 词：水热动态假说；结构方程模型；空间相关性；干旱区；湿地保护

文章编号：1000－6060(2023)01－0086－08(0086～0093)

水热条件是影响一个区域物种多样性的重要因素，对于理解生物多样性的空间分布规律具有重要意义[1]。水热动态假说（Water-energy dynamics hypothesis）较好地解释了水分和热量因子对植物丰富度的影响，在荒漠[2-3]、山地森林[4-6]等生态系统以及特定生物类群[7-9]中都得到广泛验证。但是，在不同的研究区域和研究对象中，水分和热量因子对物种丰富度的影响存在差异。如对于高海拔山区[4-6]或者高纬度地区[1]，热量条件（温度）对物种丰富度的影响更为明显，而在干旱区，水热因子共同影响植物丰富度[3]。另外，最近研究也表明水分与热量之间存在着相互作用，如在干旱区的低热量地区，水分促进丰富度，但是在高热量地区，水分降低丰富度[1]，因此针对不同的地理区域或者生态系统类型，水分和热量条件对物种丰富度的主导作用仍需进一步验证。

湿地是处于水陆过渡界面的生态系统，以往较少关注更大的地理空间尺度上气候因素对湿地植物多样性分布格局的影响。根据我国著名沼泽学家黄锡畴的观点，湿地（原文为沼泽）分布即使是隐域性的，其土壤、植被也无不打上地带性的烙印[10]，换而言之，湿地植物分布仍然受到地带性气候因素的强烈制约。如研究发现，大兴安岭永久冻土湿地草本植物多样性随着纬度降低而增加[11]，河西走廊水生植物群落分布与海拔、经纬度等环境因子有关[12]，体现出大尺度上地理因素的控制作用。新疆

收稿日期：2022-06-03；　**修订日期：**2022-08-20
基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2019D01C332）；伊犁师范大学引进博士科研启动基金（2018005）资助
作者简介：韩大勇（1978-），男，博士，教授，主要从事干旱区植物多样性和湿地植被恢复等方面研究. E-mail: 17986754@ylnu.edu.cn
通讯作者：牛忠泽（1969-），男，高级经济师，主要从事湿地及自然保护地研究. E-mail: niuzz@vip.sina.com

深处内陆，湿地分布总体表现出岛状孤立分布于荒漠"海洋"的格局[13]，水系彼此不连通，因此不论河流湿地，还是湖泊湿地，均打上了干旱的烙印，如水位波动大、地表蒸发强烈、土壤盐碱化、水体矿化度高，湿地植被中仍然有大量的地中海、中亚旱生成分等[14]。因此，地带性气候因素（水热条件）对新疆湿地植物丰富度空间分布格局的影响程度如何是一个值得探究的问题。

新疆湿地分布广、类型丰富、面积大，湿地保护工作成效显著。据新疆维吾尔自治区第三次全国国土调查数据，新疆湿地总面积达到152.45×10^4 hm^2[15]，流域上隶属2个一级流域、12个二级流域和26个三级流域。当前新疆的湿地生态保护工作正处于建设国家、国际重要湿地的关键节点，了解湿地的物种多样性的空间分布格局及其驱动因素，对于推进新疆湿地生态保护工作以及制定科学的保护措施具有重要指导意义。为此，本研究以新疆6个二级流域中重要的、有代表性的26处湿地公园或湿地保护区为研究对象，通过实地调查和查阅资料，获得26处湿地的物种丰富度数据和气候数据，探讨水热条件对新疆湿地植物多样性的影响及其作用过程，为新疆湿地生态建设提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　研究对象

本研究涉及26处湿地公园，分属阿尔泰山南麓诸河、天山北麓诸河、中亚西亚内陆河区、塔里木河源流、塔里木盆地荒漠区和吐哈盆地小河6个二级流域，具体见表1。就空间分布范围而言，26处湿地中，最北部为额尔齐斯河流域哈巴河阿克齐国家湿地公园，最南部为民丰尼雅国家湿地公园，最东部为吐鲁番艾丁湖国家湿地公园，最西部为温泉博尔塔拉河国家湿地公园。在气候区划上涵盖了亚干旱区（包括天山区、阿勒泰山区和伊宁区）、干旱区（包括塔城区、额尔齐斯–乌伦古河区和准噶尔盆地）和极干旱区（塔里木盆地地区）[16]，26处湿地具有明显的气候分异。

1.2　数据来源

26处湿地中，福海乌伦古湖国家湿地公园等15处湿地（表1）的植物数据为实地调查获得。调查时间为2020年4—11月。调查之前通过参阅相关资料和走访湿地管理人员，确定湿地公园主要植被类型及其分布状况，按照不同的植被类型进行记名调查。包括荒漠、盐生草甸、草甸、沼泽、灌丛、森林等主要类型。每个植被类型设置5个样地，样地面积10 m×10 m，记录植物种类、盖度指标，将样地内出现的所有植物种数作为湿地公园的总植物种数。余下可可托海国家湿地公园等11处湿地的植物数据通过湿地公园（保护区）管理机构获得。

湿地公园或保护区的地理位置、海拔和气候数据以及面积数据均通过新疆林草局湿地处获得。气候数据来自各湿地公园（保护区）小气候站的观测记录，计算近10 a以来各气候要素的年平均值。

1.3　数据分析

基于获得的湿地公园或保护区的植物总种数数据和面积数据，植物丰富度（D）采用Gleason指数，公式如下：

$$D = S/\ln A \qquad (1)$$

式中：S、A分别为湿地公园或保护区的植物物种总数、总面积（m^2）。

采用结构方程模型分析各要素与湿地物种丰富度的关系，由于结构方程模型本质上为线性回归分析，因此在分析前对数据进行标准化处理，以满足正态要求。预先进行一元线性回归分析发现湿地面积与物种丰富度无关，为此，在结构方程模型中未包括面积数据，仅将经度（LON）、纬度（LAT）、海拔（ALTI，m）、年平均日照时数（MAS，h）、年平均气温（MAT，℃）、年平均降水量（MAP，mm）和年平均蒸发量（MAE，mm）7个变量纳入模型。对纳入模型的变量进一步计算方差膨胀因子（vif），以去除共线性的影响，经计算，各变量的vif值均小于10，满足分析要求。

在构建结构方程模型时，根据各要素的作用方式，以经纬度作为首要影响因素，其次是地形因子海拔，最后为气象因子。在气象因子中，先后顺序为年平均日照时数、年平均气温和年平均降水量；年平均蒸发量受以上3个因素的影响[17-18]，在模型中排在最后，根据以上思路，构建的基本模型见图1。采用偏最小二乘方法估计路径系数，并采用蒙特卡罗置换检验系数显著性，置换次数99次。在最终模型中，显示所有的直接路径和路径系数显著的间接路径，根据路径系数衡量各要素对植物物种丰富度的直接效应和间接效应，直接效应和间接效应

表1 新疆26处湿地所属流域概况

Tab. 1 Basin overview of 26 wetlands in Xinjiang

二级流域	三级流域	湿地公园或保护区	代码
I阿尔泰山南麓诸河	I1乌伦古河	1福海乌伦古湖国家湿地公园*	WLGH
	I2哈巴河	2哈巴河阿克齐国家湿地公园*	AKQ
	I3额尔齐斯河	3富蕴可可托海国家湿地公园	KKTH
II天山北麓诸河	II1艾比湖水系	4艾比湖湿地国家级自然保护区*	ABH
	II2东段诸河	5呼图壁大海子国家湿地公园	DHZ
		6阜康特纳格尔国家湿地公园	TNGE
		7吉木萨尔北庭国家湿地公园*	BT
		8玛纳斯国家湿地公园	MNS
	II3中段诸河	9博乐博尔塔拉河湿地公园*	BL
		10赛里木湖国家湿地公园	SLM
		11温泉博尔塔拉河国家湿地公园*	WQ
III中亚西亚内陆河区	III1伊犁河	12伊宁伊犁河国家湿地公园*	YN
		13霍城伊犁河国家湿地公园*	HC
		14特克斯国家湿地公园*	TKS
		15察布查尔县伊犁河国家湿地公园*	CBCE
		16昭苏特克斯河国家湿地公园*	ZS
		17尼勒克喀什河国家湿地公园*	NLK
		18新疆天山阿合牙孜国家湿地公园*	AHYZ
	III2额敏河	19塔城五弦河国家湿地公园	WXH
IV塔里木河源流	IV1阿克苏河	20阿合奇托什干河国家湿地公园*	TSGH
	IV2开孔河	21博斯腾湖国家湿地公园*	BSTH
		22尉犁罗布淖尔国家湿地公园	LBNE
		23和硕塔什汗国家湿地公园	TSH
		24焉耆相思湖国家湿地公园	XSH
V塔里木盆地荒漠区	V1塔克拉玛干沙漠	25民丰尼雅国家湿地公园	NY
VI吐哈盆地小河	VI1吐鲁番盆地	26吐鲁番艾丁湖国家湿地公园	ADH

注:*表示本研究实地调查的湿地公园或保护区。

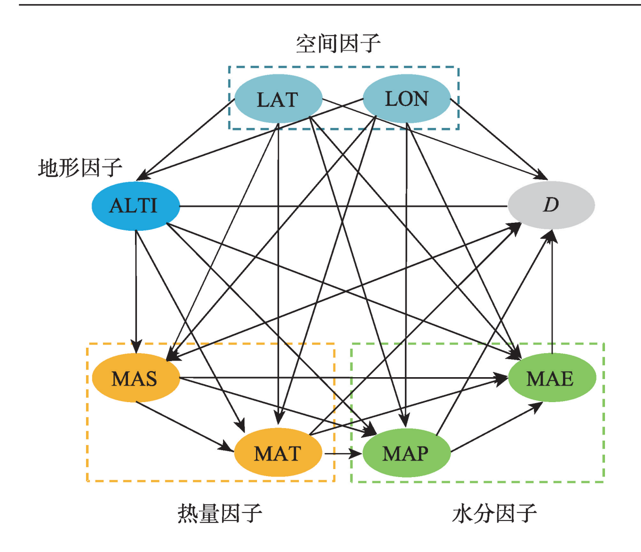
之和为总效应。

在处理地理数据时,由于空间相关性的存在,会导致犯I类错误的风险增加,即容易拒绝原假设H_0,过高的估计各气候要素对物种丰富度的效应。本研究中,预先进行了空间自相关的全局检验,结果显示各气候因子均存在显著的空间相关性($P<0.05$),因此物种丰富度可能存在依赖性空间相关。结构方程模型虽然能够区分各影响因素的直接效应和间接效应,但是不能判断空间相关性。为此,本研究应用莫兰指数检验了环境因子与物种丰富度回归模型(最小二乘回归)残差在不同空间距离下的相关性,绘制各气候要素与物种丰富度回归方程模型残差的空间相关图。莫兰指数应用蒙特卡洛置换检验显著性,置换次数99次。如果在各个空间距离上,各气候因子回归模型残差的莫兰指数均不显著,说明气候因子对物种丰富度的解释是可信的,不存在空间相关性的影响,否则就不能排除空间相关性的作用,意味着空间结构对物种丰富度有影响,如空间距离。

数据分析应用R统计语言(R Development Core Team 2015)完成,使用的程序包有“vegan”“plspm”“rgdal”。文中所有统计分析显著水平P=0.05。

2 结果与分析

26处湿地总计出现植物823种,就单个湿地而言,赛里木湖国家湿地公园植物种数最多,为639种,相应植物丰富度为54.261;艾丁湖国家湿地公园



注：D为物种丰富度；LON为经度；LAT为纬度；ALTI为平均海拔；MAS为年平均日照时数；MAT为年平均气温；MAP为年平均降水量；MAE为年平均蒸发量。下同。

图1 结构方程模型的基本模型

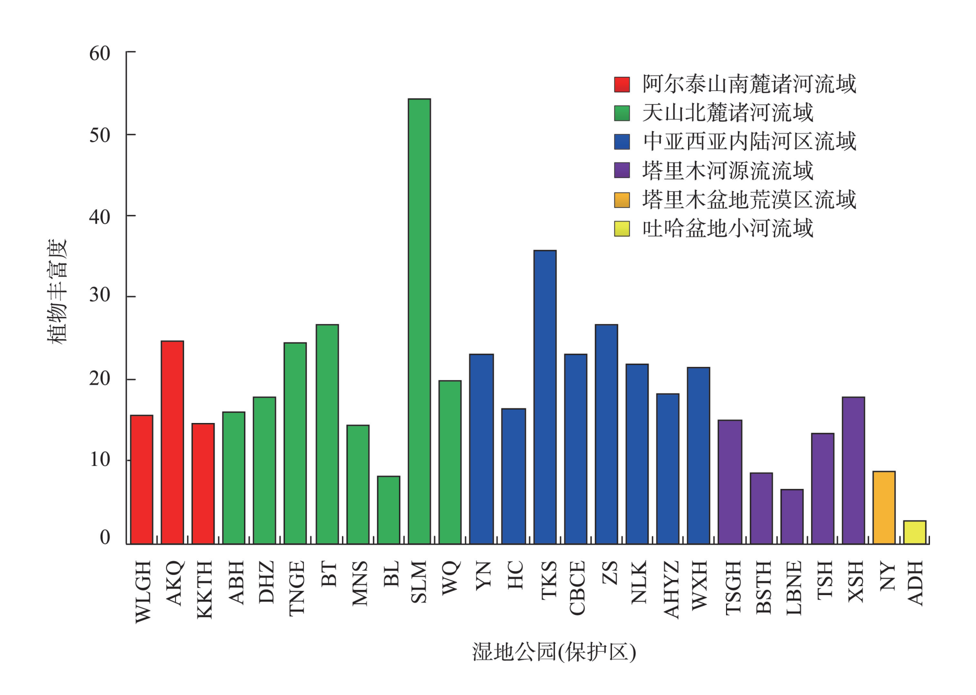
Fig. 1 Basic model of structural equation model

的植物种数最少，仅29种，相应植物丰富度为2.823。就流域而言，伊犁河流域和额尔齐斯河流域湿地的植物丰富度普遍较高，塔里木河流域的植物丰富度较低(图2)。

结构方程模型分析结果表明，所有的环境变量共解释了41.8%的植物丰富度变异，不同的因子影响程度不同。在气候因子中，仅年平均降水量和年平均日照时数对植物丰富度有显著的直接影响，路径系数分别为0.390和−0.199。空间因子对植物丰富度的直接效应不显著，但是间接效应显著，如纬度和海拔均对年平均日照时数有显著的负面影响，路径系数分别为−0.848和−0.844；而经度对年平均降水量有显著的负面影响，路径系数为−0.227，表明空间因子通过影响年平均降水量和年平均日照时数进而对物种丰富度产生间接影响。年平均蒸发量对植物丰富度无显著影响(图3)。

从总效应来看，各环境因素重要性大小顺序为年平均降水量>年平均日照时数>海拔>纬度>经度>年平均气温>年平均蒸发量。其中，年平均降水量的总效应为0.47，对植物丰富度的影响最大，其直接效应达到0.39，间接效应为0.08；年平均日照时数的总效应为−0.42，其直接效应为−0.19，间接效应为−0.23，表明新疆湿地植物丰富度受水分条件和热量条件的共同制约(图4)。

空间相关性分析表明，各个因子无论在哪个空间距离尺度上，其残差均不存在空间相关性，莫兰指数在−0.15~0.10范围内波动，未拒绝原假设，说明本文中的各环境因子对物种丰富度解释是可信的，无空间相关性的影响(图5)。



注：湿地公园(保护区)代码含义见表1。

图2 新疆26处湿地植物丰富度空间分布格局

Fig. 2 Spatial pattern of plant species richness in 26 wetlands of Xinjiang

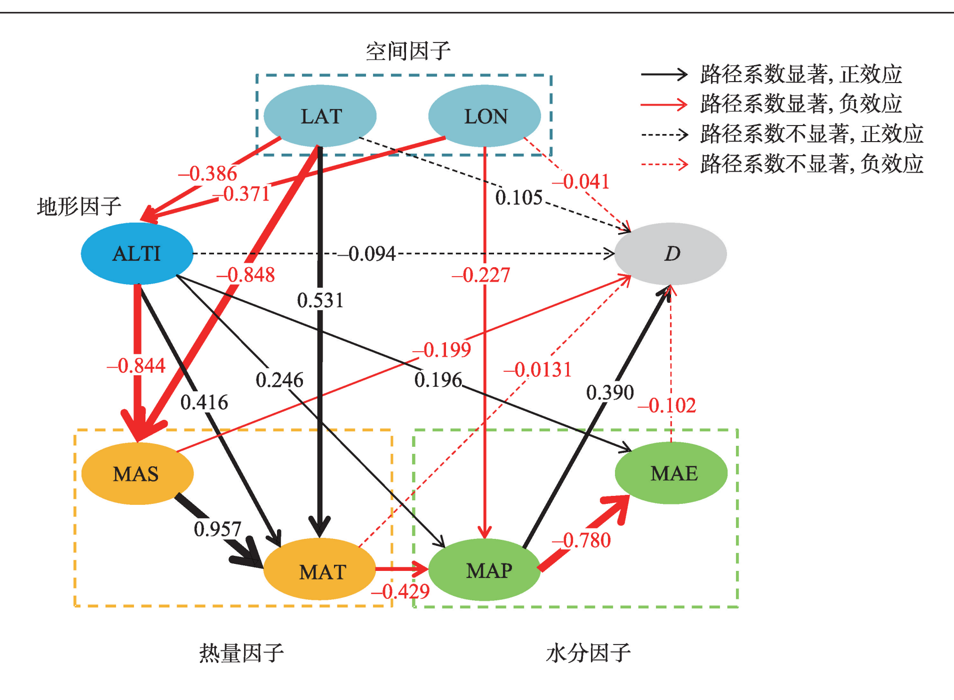
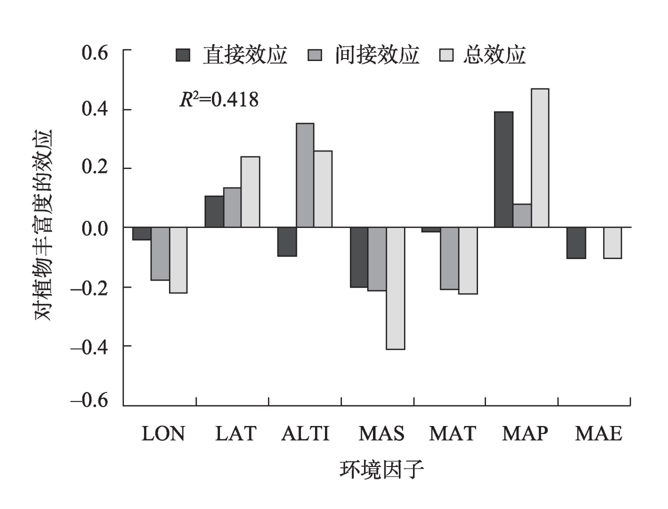


图3 新疆26处湿地植物丰富度与环境因子的结构方程模型

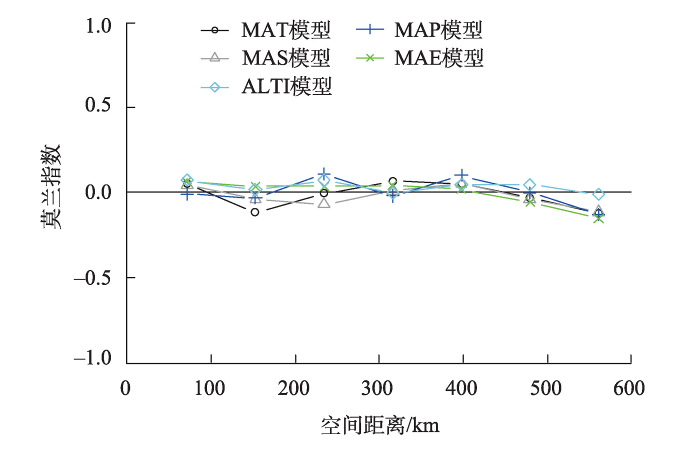
Fig. 3 Structural equation model of plant species richness and environmental factors in 26 wetlands of Xinjiang



注:总效应=直接效应+间接效应。

图4 新疆26处湿地环境因子对植物丰富度的效应分析

Fig. 4 Effect analysis of environmental factors on plant species richness in 26 wetlands of Xinjiang



注:更大的距离下连接数过少,图中未显示。

图5 新疆26处湿地气候因子和地形因子与植物丰富度回归方程残差的空间相关性

Fig. 5 Spatial correlation of regression residuals between climatic factors, topographic factors and species richness in 26 wetlands of Xinjiang

3 讨 论

地理尺度物种丰富度分布格局及其影响因素是宏生态学的核心问题[19]。一个区域的物种多样性在大尺度上既与物种的演化历史有关,也和区域的水热条件有关。本研究主要探讨了空间因子、地形因子和气候因子对新疆湿地植物多样性的影响,研究结果支持了以往的结论,干旱区的湿地植物丰富度受水热条件的共同制约,年平均降水量和年平均日照时数分别作为显著的环境因子影响湿地植物丰富度。其原因在于:(1)新疆湿地普遍存在相当面积的旱地,如艾比湖湿地、博斯腾湖湿地等均存在大面积的盐碱地或沙地[20–21],因此水分条件仍是制约新疆湿地植物多样性的主要因素,随着降水量增加,促进了湿地的中生植物、湿生植物的发育,从而增加植物多样性;(2)年平均日照时数影响一个地区的热量情况,代表着太阳辐射能的多少,由

于新疆地处温带地区，植物地理成分组成以北温带分布和旧世界温带分布为主[14]，因此热量状况的改善也有利于增加湿地植物多样性。

在以往的研究中，水分和热量对物种多样性格局的作用程度显示出较大的地域差异，如有研究显示热量影响物种多样性[1,4-6]，也有研究表明水分与热量存在互作，共同影响物种多样性[1,22]。本文应用结构方程模型探讨了各因子的直接效应和间接效应，结果表明年平均降水量的影响最大，且以直接效应为主，其间接效应主要是通过影响年平均蒸发量，进而影响物种多样性，而年平均日照时数则同时以直接效应和间接效应为主，其间接作用途径为年平均日照时数→年平均气温→年平均降水量→物种丰富度。因此，年平均降水量和年平均日照时数对植物丰富度的影响机制存在差异，与年平均降水量相比，年平均日照时数的间接效应增加，说明热量的作用在较大程度上依赖于水分，二者之间存在相互作用，该结果进一步深化了对各种气候要素的作用过程和机制的认识。

在全球尺度上，物种多样性通常随着纬度增加而减少[23]。在本研究中，随着纬度的增加，物种多样性无明显变化趋势，未表现出相关性，这与本研究中湿地的分布格局有关。新疆湿地的发育严格依赖于山区冰雪融水[13]，结果也显示物种多样性高的湿地均分布于天山或阿尔泰山，尽管伊犁河流域的8处湿地隶属中亚内陆河二级流域，但是也依赖于天山冰雪融水，所以发源于各大山系的河流、湖泊周围发育了大面积的湿地，导致各湿地分布相对集中，这正是湿地分布的隐域性的体现。尽管经纬度的直接作用不显著，但是结构方程模型结果显示，经纬度均存在显著的间接效应。如纬度显著影响年平均日照时数和年平均气温，但是对降水没有显著影响(在模型中未予显示)，说明纬度影响了热量情况，经度对年平均降水量有显著的直接效应，进而影响物种丰富度。类似的还有海拔，海拔对年平均日照、年平均气温、年平均降水量和年平均蒸发量都有显著影响，即同时影响水热条件[24]，因此对物种丰富度也有显著的间接效应。综上，尽管湿地是隐域分布性质的，但是物种分布仍然受到地带性水热条件的制约，支持了黄锡畴[10]的观点。

在地理尺度上，物种丰富度和环境因子都存在空间相关性，因此物种丰富度格局既可能本身具有空间相关性，也可能是环境因子有空间相关性而导致的[25-26]。本研究中，对各影响因子残差的莫兰指数进行了检验，发现在各个空间尺度上均未表现出空间相关性。原因可能是本研究的26处湿地分布于3大流域，主要受天山和阿尔泰山冰雪融水的影响，水系上彼此孤立，物种交换和联系较少。因此，各流域的湿地生物区系发育过程的孤立性导致空间相关性比较弱。

4 结 论

本研究应用结构方程模型分析了经度、纬度、海拔、年平均降水量、年平均气温、年平均蒸发量和年平均日照时数对新疆26处湿地公园(保护区)植物丰富度的影响，主要结论如下：(1) 新疆湿地植物丰富度受水热条件的共同制约，年平均降水量和年平均日照时数分别作为显著的环境因子影响湿地植物丰富度。(2) 年平均降水量对物种丰富度影响最大，总效应为0.47，年平均日照时数对物种丰富度影响次之，总效应为-0.42。(3) 水分对植物丰富度的影响主要表现为直接效应，热量对植物丰富度的影响主要是间接效应。热量对植物丰富度的影响在较大程度上依赖于水分条件。(4) 本研究进一步加深了对水热条件如何影响湿地植物丰富度的认识，为了更好地推进湿地生态保护工作，应加强气候变化对植物多样性影响的评估和应对措施。

参考文献(References)

[1] Hawkins B A, Field R, Cornell H V, et al. Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness[J]. Ecology, 2003, 84(12): 3105–3017.

[2] Li L P, Wang Z H, Zerbe S, et al. Species richness patterns and water-energy dynamics in the drylands of northwest China[J]. PLoS One, 2013, 8(6): e66450, doi: 10.1371/journal.pone.0066450.

[3] 王健铭, 钟悦鸣, 张天汉, 等. 中国黑戈壁地区植物物种丰富度格局的水热解释[J]. 植物科学学报, 2016, 34(4): 530–538. [Wang Jianming, Zhong Yueming, Zhang Tianhan, et al. Plant species richness patterns and water-energy dynamics in the black gobi desert, China[J]. Plant Science Journal, 2016, 34(4): 530–538.]

[4] 刘洋, 张一平, 何大明, 等. 纵向岭谷区山地植物物种丰富度垂直分布格局及气候解释[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊2): 43–50. [Liu Yang, Zhang Yiping, He Daming, et al. Vertical distribution pattern and climate interpretation of plant species richness in mountainous areas in longitudinal range-gorge region[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Suppl. 2): 43–50.]

[5] Panda R M, Behera M D, Roy P S, et al. Energy determines broad pattern of plant distribution in western Himalaya[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(24): 10850-10860.

[6] Panda R M, Behera M D, Roy P S, et al. On the relationships between plant species richness and the environment: A case study in eastern Ghats, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 191: 784, doi: 10.1007/s10661-019-7686-7.

[7] Chen S B, Jiang G M, Ouyang Z Y, et al. Relative importance of water, energy, and heterogeneity in determining regional pteridophyte and seed plant richness in China[J]. Journal of Systematics and Evolution, 2011, 49(2): 95-107.

[8] Cong J, Su X J, Liu X, et al. Changes and drivers of plant community in the natural broadleaved forests across geographic gradient [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 361-366.

[9] Liang J C, Ding Z F, Lie G W, et al. Species richness patterns of vascular plants and their drivers along an elevational gradient in the central Himalayas[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: e01279, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01279.

[10] 黄锡畴. 试论沼泽的分布和发育规律[J]. 地理科学, 1982, 2(3): 193-201. [Huang Xichou. An approach to distribution and development law of mire[J]. Scientia Geographica Sinica, 1982, 2(3): 193-201.]

[11] 孙菊, 李秀珍, 胡远满, 等. 大兴安岭沟谷冻土湿地植物群落分类、物种多样性和物种分布梯度[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2049-2056. [Sun Ju, Li Xiuzhen, Hu Yuanman, et al. Classification, species diversity, and species distribution gradient of permafrost wetland plant communities in Great Xing'an Mountain valleys of northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2049-2056.]

[12] 田玉清, 石道良, 张淑倩, 等. 河西走廊水生植物多样性格局、群落特征及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 202-212. [Tian Yuqing, Shi Daoliang, Zhang Shuqian, et al. Biogeographic pattern, main community types, and the influencing factors of aquatic macrophytes in the Hexi Corridor of northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 202-212.]

[13] 努尔巴衣·阿布都沙力克, 塔西甫拉提·特依拜, 巴哈尔古丽. 湿地综述与新疆湿地研究[J]. 新疆环境保护, 2004, 26(增刊1): 63-66. [Abdusalih Nurbay, Tiyip Tashpolat, Mamet Bahargul. Wetland synthesis and the study on wetland in Xinjiang[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2004, 26(Suppl. 1): 63-66.]

[14] 刘丽燕, 蔡新斌, 江晓珩, 等. 新疆湿地野生维管植物组成与植物区系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(9): 83-88. [Liu Liyan, Cai Xinbin, Jiang Xiaoheng, et al. Species composition and flora components of wetland vascular plants in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(9): 83-88.]

[15] 新疆维吾尔自治区自然资源厅. 新疆维吾尔自治区第三次全国国土调查主要数据公报[EB/OL]. [2022-01-12]. http://zrzyt.xinjiang.gov.cn/xjgtzy/gzdt/202201/c7061f858692402da4f7b65e376cd2fb.shtml. [Department of Natural Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Main data bulletin of the third national land survey of Xinjiang Uygur Autonomous Region[EB/OL]. [2022-01-12]. http://zrzyt.xinjiang.gov.cn/xjgtzy/gzdt/202201/c7061f858692402da4f7b65e376cd2fb.shtml.]

[16] 毛炜峄, 南庆红, 史红政. 新疆气候变化特征及气候分区方法研究[J]. 气象, 2008, 34(10): 67-73. [Mao Weiyi, Nan Qinghong, Shi Hongzheng. Research of climatic regionalization with climate change in Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(10): 67-73.]

[17] 杜东升, 廖玉芳, 谢佰承. 湖南年蒸发量时空演变特征及气象影响因子分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 263-268. [Du Dongsheng, Liao Yufang, Xie Baicheng. Spatiotemporal variability of annual evaporation and the impact of meterological factors in Hunan Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(32): 263-268.]

[18] 杜连海, 罗盼盼, 吴记贵, 等. 松山自然保护区蒸发量和降水量的变化特征及其原因分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14): 184-189. [Du Lianhai, Luo Panpan, Wu Jigui, et al. Change characteristics of evaporation and rainfall in Songshan Nature Reserve and their causes[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(14): 184-189.]

[19] 王志恒, 唐志尧, 方精云. 物种多样性地理格局的能量假说[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 613-624. [Wang Zhiheng, Tang Zhiyao, Fang Jingyun. The species-energy hypothesis as a mechanism for species richness patterns[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 613-624.]

[20] 任立清. 艾比湖流域植被时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 467-477. [Ren Liqing. Spatiotemporal change and driving force of vegetation in Ebinur Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 467-477.]

[21] 钟巧, 焦黎, 李稚, 等. 博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 103-112. [Zhong Qiao, Jiao Li, Li Zhi, et al. Spatial and temporal changes of potential evapotranspiration and its attribution in the Bosten Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 103-112.]

[22] 李利平, 努尔巴依·阿布都沙力克, 王少鹏, 等. 新疆野生维管束植物物种丰富度分布格局的水热解释[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 25-30. [Li Liping, Abdusalih Nurbay, Wang Shaopeng, et al. Distribution patterns and climatic explanations of species richness of vascular plants in Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 25-30.]

[23] 周红章, 于晓东, 罗天宏, 等. 物种多样性变化格局与时空尺度[J]. 生物多样性, 2000, 8(3): 325-336. [Zhou Hongzhang, Yu Xiaodong, Luo Tianhong, et al. How does species diversity change? Spatio-temporal patterns and scales[J]. Chinese Biodiversity, 2000, 8(3): 325-336.]

[24] 郭玉琳, 赵勇, 周雅蔓, 等. 新疆天山山区夏季降水日变化特征及其与海拔高度关系[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 57-65. [Guo Yulin, Zhao Yong, Zhou Yaman, et al. Diurnal variation of summer precipitation and its relationship with altitude in Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 57-65.]

[25] Hawkins B A, Porter E E. Water-energy balance and the geographic pattern of species richness of western Palearctic butterflies[J]. Ecological Entomology, 2010, 28(6): 678−686.

[26] Chen S B, Mao L F, Zhang J L, et al. Environmental determinants of geographic butterfly richness pattern in eastern China[J]. Biodiversity and Conservation, 2014, 23(6): 1453−1467.

Spatial distribution pattern of wetland plant species richness driven by water and heat conditions collectively in Xinjiang

HAN Dayong[1], NIU Zhongze[2], WU Yongming[3], GAO Jian[2]

(1. College of Biological and Geographical Sciences, Yili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China;
2. Desert Engineering Survey and Design Institute, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Forestry and Grassland Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830099, Xinjiang, China)

Abstract: On the geographic spatial scale, climate factors (such as environmental energy and precipitation) are the main driving factors of plant species diversity. However, it remains unclear whether climatic factors can explain the plant diversity in wetlands. This study discusses the influence of environmental factors, especially the effect of water and heat conditions on the distribution of wetland species. Specifically, it includes four categories and seven indicators, including spatial factors (longitude and latitude), terrain factors (altitude), water factors (annual average precipitation and evaporation), and heat factors (annual average air temperature and sunshine hours). The research objects involve 26 wetland parks in three secondary river basins in Xinjiang, China. The structural equation model is used to explore the relative importance of each indicator on wetland plant richness and their interaction. In addition, Moran's *I* index is used to analyze the spatial correlation of the residuals of each variable to evaluate the impact of spatial correlation. The results show that (1) the structural equation model explains 41.8% of the variation in plant species richness. The total effect of annual average precipitation on species richness is the highest, which is 0.47, followed by the annual average sunshine hours, which is −0.42. Among them, the annual average precipitation has a positive effect, whereas the annual average sunshine hours have a negative effect. The effects of other indices on species richness are insignificant. (2) The influence of annual average precipitation on plant richness is primarily a direct effect, which is 0.39, accounting for 92.86% of the total effect. The influence of annual average sunshine hours on plant richness is primarily an indirect effect, which is −0.23, accounting for 54.76% of the total effect. (3) Spatial correlation analysis shows that there is no spatial correlation between the residuals of annual average precipitation and sunshine hours on different spatial scales, and the Moran's *I* index fluctuates within the range of −0.15 to 0.10, which could be considered reliable prediction indices. (4) The direct effects of spatial factors such as longitude and latitude on plant richness are insignificant, whereas the indirect effects are significant. Longitude significantly affects the annual average precipitation, and latitude significantly affects the annual average sunshine hours and temperature, indicating that spatial factors indirectly affect the species richness by affecting the annual average precipitation and sunshine hours. In conclusion, the plant richness of the wetlands in Xinjiang is primarily driven by water and heat conditions. The role of heat depends on the water conditions. In future wetland plant diversity protection studies, the assessment and response measures of the impact of climate change on plant diversity should be strengthened.

Key words: water-energy dynamics hypothesis; structural equation model; spatial correlation; arid area; wetland protection